

早稲田大学大学院 創造理工学研究科

博 士 論 文 概 要

論 文 題 目

薬液注入における限界注入速度決定の
問題点とその改善に関する研究

Study on Improvement of the Determining
Method for Critical Injection Rate in
Chemical Grouting

申 請 者

福 井 義 弘

Yoshihiro FUKUI

2020年 4月

薬液注入は止水や強度増加を主たる目的とした地盤改良工法の一つであり、開削工事やシールドトンネル、近年では増加している線路下横断工事など地下水面下の地盤の掘削を実施する場合に広く用いられている。この工法は、簡便で迅速な処理が可能で、狭隘な空間においても施工できる特長がある。このように他の工法では代替できない場合が多いので、今後とも広く採用されるものと想定される。しかし、重要な注入効果における確実性の面では、未だに十分な信頼性を確保できているとは言い難い。このことが薬液注入工法の最大の問題点であり、これを解決するには薬液の浸透状態を支配する主要因とその対応手段を見出す基礎研究が必要不可欠である。

薬液注入は砂質系地盤を主対象とするので、この場合その効果を確実にするには、設計段階の想定のように、注入孔の各ステップにおける薬液の浸透固結体が球状または円筒状で良好なまとまった形状になり、隣接ステップの固結体と漏れなく連結一体化させることが必要である。これこそが薬液注入の基本思想とも言える。この基本思想の立場から、薬液の浸透固結形状に注目し研究を進めた結果、固結形態に最も影響を及ぼす因子は、注入の際に地盤中に進展する割裂面の大きさであることが確認された。このことより良好にまとまった固結形状にするための薬液の浸透面となる割裂面積の許容限界の定量化は極めて重要となる。ここで、発生する割裂面積の大きさは、注入地点の地盤状態と注入速度によって決まり、許容割裂面積に達する注入速度を限界注入速度と定義付けた。薬液注入においては注入地盤の限界注入速度以下の注入速度を用いることが必要条件であり、それによって良好にまとまった固結形状になり得る。一方でこの限界注入速度の決定理論と実際地盤における試験方法については、限界注入速度試験の普及に伴って新たな問題が生じてきた。

本論文では、限界注入速度の決定に係わるこうした問題点を分析し、それに関する修正法を提案するとともに、その妥当性を検証した一連の研究について言及している。本論文は緒言から結論までの全6章で構成されており、以下に各章の概要を述べる。

第1章は緒言であり、薬液注入が地盤改良工法の一つとしてこれまで果たしてきた役割を概観するとともに、その中で限界注入速度の考え方が適正な注入施工の基本となっていること、他方、限界注入速度試験の普及に伴って新たな課題が明らかになり、その解決に向けての改善に関する提案に至った本研究の経緯などを述べる。

第2章では、薬液注入に関する既往の研究をまとめ、多面的なアプローチで信頼性向上の研究が実施されてきたことや残された課題について述べるとともに、既往の研究と本研究との連関についても述べる。

第3章では、限界注入速度の重要性とその決定に際しての問題点を詳述するが、要約すると以下のとおりである。

限界注入速度の決定には、段階的に増加させていく注入速度 q とそれに応じた注入圧 p との関係を表す $p \sim q$ 曲線が基本となるが、この $p \sim q$ 曲線は注入による地盤の割裂状況を示すことから、当然のことながら正確なものでなければならない。しかし、本研究により、 $p \sim q$ 曲線のプロットの値や曲線の形状を地盤の割裂圧やその他の条件を考慮して修正しなければならない場合のあることがわかった。それ故、限界注入速度の正しい決定には、 $p \sim q$ 曲線の修正の有無を判別する必要がある、それに際しては実務上熟練を要することが明らかとなった。そのうえ $p \sim q$ 曲線に必要な現場注水試験はかなりの手間を要する上、1孔で1つの $p \sim q$ 曲線が得られるのみであるので、広範囲にわたる薬液注入範囲の地盤の限界注入速度をより詳しく調査するのは容易ではない。そのためこれらの問題点を改善した容易で簡便な限界注入速度の測定法の考案が実際の薬液注入に際して強く要望されるところである。以上が限界注入速度決定における問題点である。

第4章では、限界注入速度決定における問題点を分析し、それに基づき限界注入速度測定に関し、新たに容易で簡便な修正法について提案する。本研究で得られた成果は以下のとおりである。

(1)限界注入速度は作図した $p \sim q$ 曲線に基づいて決定するが、限界注入速度に最も影響する初期直線勾配 i_0 の決め方は必ずしも容易ではない。この勾配部の最高点は地盤の割裂発生圧 p_f であるが、これを $p \sim q$ 曲線上で明確に判定できない場合は i_0 の誤差が出やすい。このような場合に対して、その地盤に適用可能な最小割裂発生圧による修正法を提案した。

(2)限界注入速度試験中の p と経過時間 t の関係曲線が上昇型になる場合がある。これは地盤の構造などから注入により地盤の間隙圧が上昇したことを意味するもので、その上昇分とそれ以前の段階で生じた上昇分の全合計量を差し引き、修正した p を用いたプロットによる $p \sim q$ 曲線にすれば、誤差の少ない限界注入速度を決定できる。

(3) $p \sim q$ 曲線の $q=2(\ell/\text{min})$ と $q=10(\ell/\text{min})$ にあたる注入圧を各々 p_2 、 p_{10} としたとき、 p_{10}/p_2 は地盤の透水特性と注入速度 q の増加に伴う地盤の割裂進展特性をよく表している。

(4) p_{10}/p_2 値は限界注入速度 q_{cr} と密接な相関があり、実測結果より次のような簡便な関係式が得られた。

$$q_{cr} = 10 \{ (p_{10}/p_2) - 1 \} (\ell/\text{min})$$

q_{cr} は $p \sim q$ 曲線の作図時に誤差が入りやすい場合があるので、実測した q_{cr} の妥当性を本式でチェックすることは有効であり、実測値と本式による値に大きな違いのある場合には、むしろ本式による q_{cr} を採用すべきである。

(5)現場注入孔を利用して $q=2(\ell/\text{min})$ と $q=10(\ell/\text{min})$ の2段注入を行い、 p_{10}/p_2 値を精度よく測定できれば q_{cr} の推定が可能になり、現場の注入管理上大きな利点となる。そこでダブルパッカー方式を用いた注入現場についてこれを実

施し，その p_{10}/p_2 値の妥当性を検証したが，平均的には低めの値になり，またばらつきも大きかった．この原因はダブルパッカー方式における薬液の浸透面積を決定するシールグラウトの注入に伴って割裂進展面積に変化が生じることと，注入圧力を支配する真の管内抵抗の測定ができないことによる．

第5章では，本論文の主題である限界注入速度試験が学識経験者，鉄道事業者，鉄道・運輸機構，鉄道総合技術研究所で構成される「注入の設計施工マニュアルに関する検討会」で審議され，鉄道構造物の設計施工に係る基準である「注入の設計施工マニュアル」に反映されたことを述べる．筆者らの研究も含め，限界注入速度の重要性が鉄道工事での薬液注入施工において認められ，また，本論文での研究成果についても限界注入速度評価の研究事例として認められたことは，工学的見地から，研究成果の社会的貢献という意味でもその意義は大きいと考えられる．次にこの基準に則って施工され，良好な浸透固結が得られた実際の比較的規模の大きい線路下横断の推進工事での注入効果確認に関し，新たな提案を行う．通常は注入材の充填状況を確認するために実施される弾性波速度探査および固結体のシリカ濃度測定であるが，それらから注入後の圧縮強度と透水係数を推定する方法を考案し，弾性波速度探査結果からの推定値，シリカ濃度測定結果からの推定値を各々注入後の効果確認のために別途行った注液圧試験で得られた透水係数と比較した．その結果，弾性波速度探査による推定値は，粘性土，礫質土とも注液圧試験から得られた透水係数と概ね一致した．固結体のシリカ濃度による推定値は，礫質土の場合は注液圧試験で得られた透水係数と概ね一致した．一方，粘性土では乖離が見られた．注液圧試験のような原位置試験は作業時間を要するため，事前の弾性波速度やシリカ濃度の測定値を地盤条件に応じて組み合わせることにより注入効果が推定できれば大幅な効率化が期待できる．

第6章では，結論として各章で述べた結果および知見をとりまとめ，今後益々ニーズが高まると想定される地盤改良における薬液注入の本研究での課題を整理した．具体的には，第4章で指摘した限界注入速度の決定に用いる簡便式については，正規の限界注入速度試験に近い p_{10}/p_2 値が求められるようにできれば，注入の施工管理に大きく寄与できるものと考えられる．また，第5章で提案した弾性波速度探査やシリカ濃度測定値から注入後の圧縮強度や透水係数を推定する方法については，薬液注入における粗詰めを目的とした一次注入の影響による誤差も含まれているため，今後の課題としてさらなる精度向上を図る必要がある．

以上が本論文の概要であるが，本研究で得られた成果により薬液注入の信頼性を高める上で必要不可欠な限界注入速度 q_{cr} の測定は，従来に比べてはるかに迅速かつ簡便化された．また，鉄道総合技術研究所の「注入の設計施工マニュアル」で限界注入速度試験が基準化され，本研究の成果も限界注入速度評価の研究事例と位置付けられたことで，筆者の研究が実際の薬液注入における施工管理の精度向上に大きく貢献できたものとする．

早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

氏名 福井義弘 印

(2020年3月現在)

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
1. 論文 ○論文	福井義弘, 仲山貴司, 澤田 亮, 赤木寛一: 線路下横断トンネル工事に伴う薬液注入の評価, 土木学会地下空間シンポジウム論文・報告集, 第25巻, pp.27-33, 2020年1月
○論文	福井義弘, 森 麟, 赤木寛一: 薬液の限界注入速度決定の問題点とその改善に関する研究, 土木学会論文集, No.658, VI-48, pp.81-92, 2000年9月
論文	森 麟, 田村昌仁, 福井義弘, 出光 恵: 低い吐出量を高圧噴射した場合の薬液の注入状況, 土質工学会論文報告集, Vol.31, No.4, pp.209-217, 1991年12月
論文	森 麟, 田村昌仁, 福井義弘: 粘性土の割裂圧に及ぼす諸要因に関する実験的研究, 土質工学会論文報告集, Vol.31, No.1, pp.222-229, 1991年3月
論文	Akira MORI, Masahito TAMURA, Yoshihiro FUKUI: Fracturing Pressure of Soil Ground by Viscous Materials, SOILS AND FOUNDATIONS TECHNICAL NOTE (Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering), Vol.30, No.3, pp.129-136, Sept.1990
○論文	Akira MORI, Masahito TAMURA, Yoshihiro FUKUI: Distribution of Grouts in Solidified Region on Chemical Grouting, SOILS AND FOUNDATIONS TECHNICAL NOTE (Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering), Vol.29, No.4, pp.127-134, Dec.1989
2. 講演 ○講演	福井義弘, 森 麟, 江本佑橘, 小峯秀雄: 薬液注入時の p-t 曲線形による浸透状況の推定可能性 (その2), 土木学会第54回年次学術講演会講演概要集, III-B205, pp.410-411, 1999年9月
○講演	福井義弘, 森 麟, 江本佑橘, 小峯秀雄: 薬液注入時の p-t 曲線形による浸透状況の推定可能性, 土木学会第53回年次学術講演会講演概要集, III-B290, pp.580-581, 1998年10月
講演	福井義弘, 森 麟, 田村昌仁: 指向性高圧注入における薬液の注入形態とその支配条件 (不均一土層の場合), 土木学会第45回年次学術講演会講演概要集, III-202, pp.440-441, 1990年10月
講演	出光 恵, 森 麟, 江本佑橘, 田村昌仁, 福井義弘: シールド工事における粘性土地盤の割裂現象 (その1) (切羽泥水圧における割裂現象), 第25回土質工学研究発表会発表講演集, 2-2, H-5, No.659, pp.1769-1772, 1990年6月
講演	福井義弘, 森 麟, 江本佑橘, 田村昌仁, 出光 恵: シールド工事における粘性土地盤の割裂現象 (その2) (裏込め注入圧における割裂現象), 第25回土質工学研究発表会発表講演集, 2-2, H-5, No.660, pp.1773-1774, 1990年6月
講演	田村昌仁, 森 麟, 福井義弘: 指向性高圧注入における薬液の注入形態とその支配条件 (均一土層の場合), 第25回土質工学研究発表会発表講演集, 2-2, K-2, No.712, pp.1911-1914, 1990年6月

早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
講演	福井義弘，森 麟，田村昌仁，横山直樹：土及び固結材料の割裂現象に関する基礎的研究，土木学会第44回年次学術講演会講演概要集，III-298，pp.670-671，1989年10月
講演	出光 恵，森 麟，田村昌仁，福井義弘：泥水・裏込めなど高粘性材による地盤の割裂発生圧（その1）（割裂圧に及ぼす注入材の粘性の影響），第24回土質工学研究発表会発表講演集，2-2，H-5，No.635，pp.1725-1726，1989年6月
講演	福井義弘，森 麟，田村昌仁，出光 恵：泥水・裏込めなど高粘性材による地盤の割裂発生圧（その2）（割裂圧に及ぼすボアホール形状の影響），第24回土質工学研究発表会発表講演集，2-2，H-5，No.636，pp.1727-1728，1989年6月
○講演	福井義弘，森 麟，田村昌仁：ゲル化時間の短い薬液による砂地盤の割裂現象と浸透メカニズム，土木学会第43回年次学術講演会講演概要集，III-36，pp.116-117，1988年10月
○講演	福井義弘，森 麟，田村昌仁：薬液注入における薬液てん充率と砂の透水性・薬液ゲル化時間の関係，第23回土質工学研究発表会発表講演集，2-2，K-2，No.797，pp.2101-2102，1988年6月
3. その他 報文	森 麟，江本佑橘，田村昌仁，福井義弘：シールドトンネルの裏込め注入圧および切羽泥水圧による粘性土地盤の割裂現象，トンネルと地下，第22巻1号，pp.41-46，1991年1月
その他 (論文)	福井義弘，山根寛史，田淵 剛：経年省力化軌道における省力化効果について，第21回鉄道技術連合シンポジウム講演論文集，S2-3-4，2014年12月
その他 (論文)	堀 克則，福井義弘：横裂進みを考慮したシェリング傷管理手法，土木学会鉄道力学論文集，第12号，pp.55-59，2008年7月
その他 (論文)	徳岡研三，福井義弘，山口義信：列車走行安全のためのレール継ぎ目遊間の管理に関する研究，土木学会論文集，No.604，IV-41，pp.59-72，1998年10月
その他 (論文)	阿部則次，福井義弘：レール溶接部の曲げ疲労寿命推定法，日本機械学会第3回交通・物流部門大会講演論文集（鉄道シンポジウム編），第3巻，1113R，pp.99-104，1994年12月
その他 (報文)	福井義弘，千代 隆：安全の基礎となる地上設備の維持・更新への取り組み，JR ガゼット，No.317，pp.19-23，2013年8月
その他 (報文)	福井義弘：鉄道施設の技術開発－21世紀の課題と展望，日本鉄道施設協会誌，第39巻9号，pp.80-82，2001年9月
その他 (報文)	福井義弘，大西康之，松崎孝志：分岐器ポイント部 PC まくらぎ化の試験敷設，新線路，第54巻5号，pp.19-23，2000年5月

早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
その他 (報文)	福井義弘, 高尾賢一, 江後満喜: H 形スチールまくらぎの開発, 日本鉄道施設協会誌, 第37巻9号, pp.26-27, 1999年9月
その他 (報文)	福井義弘, 出村正文, 阿部則次: 現場接着絶縁継目の営業線敷設品確性試験, 日本鉄道施設協会誌, 第36巻11号, pp.31-32, 1998年11月
その他 (報文)	福井義弘, 出村正文: 改良形ガードの開発, 日本鉄道施設協会誌, 第36巻9号, pp.23-25, 1998年9月
その他 (報文)	福井義弘: 軌きょう剛性測定試験, 日本鉄道施設協会誌, 第36巻7号, pp.53-54, 1998年7月
その他 (報文)	堀池高広, 高尾賢一, 須永陽一, 安藤勝敏, 福井義弘, 内田一男: 着脱式弾性まくらぎ直結軌道(D 型弾直軌道)の開発, 鉄道総研報告, Vol.12, No.6, pp.25-30, 1998年6月
その他 (報文)	福井義弘, 出村正文, 井手寅三郎: 弾性まくらぎの動ばね定数測定, 新線路, 第52巻5号, pp.7-9, 1998年5月
その他 (報文)	福井義弘, 細川岳洋, 出村正文: 有道床弾性まくらぎの軌道特性試験結果, 日本鉄道施設協会誌, 第36巻4号, pp.17-19, 1998年4月
その他 (報文)	福井義弘: 遊間シミュレーションの提案について, 新線路, 第51巻11号, pp.49-52, 1997年11月
その他 (報文)	安藤勝敏, 小関昌信, 福井義弘, 長藤敬晴, 三浦 重: 新軌道構造の技術的経済的可能性, 鉄道総研報告, Vol.9, No.12, pp.55-60, 1995年12月
その他 (報文)	阿部則次, 福井義弘, 長藤敬晴, 石田 誠, 三浦 重: レール寿命延伸のための溶接部凹凸管理, 鉄道総研報告, Vol.8, No.11, pp.17-22, 1994年11月
その他 (講演)	福井義弘, 木川浩介, 安中 武: 新型レール交換機の開発について, 土木学会第66回年次学術講演会講演概要集, IV-176, pp.351-352, 2011年9月
その他 (講演)	福井義弘, 木川浩介, 出村正文, 服部正治, 金山尚幸: 新型橋まくらぎ交換機の開発・導入について, 土木学会第65回年次学術講演会講演概要集, IV-261, pp.521-522, 2010年9月
その他 (講演)	福井義弘, 細川岳洋, 半田真一, 高尾賢一, 堀池高広: 弾性まくらぎの軌道特性試験結果について, 土木学会第52回年次学術講演会講演概要集, IV-389, pp.778-779, 1999年9月
その他 (講演)	福井義弘, 出村正文, 徳岡研三: 新たな鉄まくらぎの開発について, 土木学会第53回年次学術講演会講演概要集, IV-456, pp.912-913, 1998年10月